

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA**

**Fakulta strojní**

**Katedra energetiky**

**Návrh zařízení pro čištění spalin z roštových kotlů**

**Proposal of cleaning flue Gasses from stocker boilers**

**Student:**

**Boháč Martin**

**Vedoucí bakalářské práce:**

**Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

**Ostrava 2010**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra energetiky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Boháč**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 3904R016 Technika tvorby a ochrany životního prostředí  
Téma: **Návrh zařízení pro čištění spalin z roštových kotlů**  
**Proposal of Cleaning Flue Gasses from Stocker Boilers**

### Zásady pro vypracování:

Zpracujte rešerži literatury a návrh zařízení na čištění spalin z roštového kotle spalujícího hnědá uhlí. Projekt řešte s ohledem na předepsané limity tuhých a plyných emisí. Zaměřte se hlavně na polosuchou dvoustupňovou vypírku spalin.

Technické parametry : tepelný výkon kotle 1,5 MWt  
palivo: severočeské uhlí  
teplota spalin na vstupu do ekobloku 250 °C

### Seznam doporučené odborné literatury:

- [ 1 ] RĚDR, M., PŘÍHODA, M. *Základy tepelné techniky*. Praha. SNTL, 1991  
ISBN 80-03-00366-0
- [ 2 ] SADIK KAKAC. *Boilers, evaporators, condensers*. John Wiley. USA. New York 1991  
CIP 90-22486 v knihovně VŠB.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

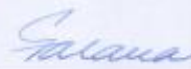
Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010



  
prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.  
vedoucí katedry

  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

## PROHLÁŠENÍ STUDENTA

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ..... 19. 5. 2010

Podpis ..... 

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Pavlu Kolatovi, DrSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Ostravě dne ..... 19. 5. 2010

..... 

(podpis autora)

Prohlašuji, že:

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnou licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 19.5. 2010 .....

.....  


Adresa trvalého pobytu:  
Pekařská 646/3, Hlučín okr. Opava

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

BOHÁČ, M. Návrh zařízení pro čištění spalin z roštových kotlů. Ostrava: Katedra energetiky, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2010, 45 str. Bakalářská práce, vedoucí prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Bakalářská práce se zabývá polosuchou metodou čištění spalin z roštového kotle o tepelném výkonu 1,5 MW. V úvodu jsou popsány vznikající škodliviny a metody, kterými je možné provést čištění spalin. Dále je navrženo zařízení pro čištění spalin se základními charakteristickými údaji od výrobce. Na základě vypočtených hodnot se výsledky porovnají s technickými údaji zařízení a tím se ověří vhodnost jeho použití pro danou problematiku.

## THE ANNOTATION OF THESIS

BOHÁČ M., Proposal of cleaning flue Gasses from stocker boilers. Ostrava: Department of energy, Mechanical Engineering Faculty VŠB – Technical university Ostrava, 2010, 45 pages, Bachelor thesis, head: prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

The bachelor thesis deals with semi-dry method of cleaning gas from stocker boiler with a heat output of 1,5 MW. The introduction describes the emerging contaminants, and the methods by which it is possible to exhaust gas cleaning. It is designed for cleaning equipment, the basic characteristic information from the manufacturer. Based on the calculated values are compared with results of technical data and equipment to verify the appropriateness of its application for the issue.

# **OBSAH**

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Kotle na spalování tuhých paliv</b>	<b>9</b>
2.1	Účinná plocha roštu .....	10
2.2	Pásový rošt .....	12
2.3	Vratisuvný rošt .....	13
2.3.1	Kaskádový .....	13
2.3.2	Martin .....	14
2.4	Přesuvný rošt .....	14
<b>3</b>	<b>Tvorba a emise škodlivin při spalování uhlí</b>	<b>16</b>
3.1	Tuhé částice .....	16
3.2	Oxidy síry .....	17
3.3	Oxid uhličitý .....	17
3.4	Oxidy dusíku .....	19
3.5	Emisní faktory .....	19
<b>4</b>	<b>Metody čištění spalin</b>	<b>21</b>
4.1	Mokrý způsob čištění spalin .....	21
4.1.1	Technologický proces odsiřování .....	22
4.2	Polosuchý proces čištění spalin .....	24
4.2.1	Rozprašovací absorpce s předodloučením popílku .....	25
4.2.2	Rozprašovací absorpce bez předodloučení popílku .....	25
4.2.3	Tampella – Lifac .....	25
4.2.4	Reaktor pro polosuchý způsob odsiřování .....	25
4.3	Suchý proces čištění spalin .....	28
<b>5</b>	<b>Návrh zařízení na čištění spalin</b>	<b>29</b>
5.1	Charakteristika pračky .....	29
5.2	Určení množství spalin .....	32
5.2.1	Množství spalin na 1kg paliva .....	34
5.2.2	Množství spalin pro jmenovité množství uhlí .....	36
5.3	Určení množství sorbentu .....	37
<b>6</b>	<b>Tryska sorbentu</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>40</b>

## Seznam použitých symbolů a značek

$q_r$	[kW/m <sup>2</sup> ]	střední měrný tepelný výkon roštu
$n$	[ - ]	součinitel přebytku vzduchu
$w$	[%]	poměrný hmotový obsah vody
$A$	[%]	poměrný hmotový obsah popeloviny
$M_{\text{pal}}$	[kg/s]	množství paliva
$\dot{m}_{\text{SO}_2}$	[kg/s]	množství SO <sub>2</sub>
$P$	[MW]	výkon kotle
$Q_i^h$	[MJ/kg]	výhřevnost hořlaviny
$Q_i^r$	[MJ/kg]	výhřevnost uhlí
$T$	[K]	teplota
$V_{\text{SP}}$	[m <sup>3</sup> /s]	množství spalín
$V_{\text{vz}}$	[m <sup>3</sup> /s]	množství vzduchu
$\dot{V}_{\text{SORB}}$	[l/h]	množství sorbentu
$\eta$	[ - ]	účinnost kotle
$\rho_v$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota vody
$\rho_s$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota sorbentu
$v$	[ - ]	korekční součinitel

### Horní index

d	bezvodý vzorek
h	hořlavina
r	surové palivo
S	suchý (vzduch, spaliny)
V	vlhký (vzduch, spaliny)

### Dolní index

celk	celkový
pal	palivo
skut	skutečný
sorb	sorbent
SP	spaliny
teor	teoretický
VZ	vzduch

# 1 ÚVOD

Životní prostředí vždy bylo, je a bude aktuální téma pro mnoho odborníků, ale i laiků. Lidé se tímto tématem v posledních letech zabývají stále častěji. Uvědomují si, že znečištěné ovzduší nemusí ovlivnit jen je samotné, ale také přírodu a další generace. Moderní doba si vyžaduje spotřebu velkého množství energie, kterou získáváme z různých zdrojů, já se ve své práci zaměřím na spalování uhlí.

Vzhledem k tomu, že zásoby uhlí jsou u nás i ve světě největší, cca na 250 let, je jeho používání pro výrobu energie perspektivní. V České republice se spalování uhlí podílí na výrobě okolo 60% energie. Ovšem zejména tato metoda s sebou nese i mnoho negativních vlivů na životní prostředí. Spalování fosilních paliv totiž patří k největším zdrojům znečišťujících ovzduší.

V současnosti se díky moderním zařízením podařilo snížit emise oxidů síry, oxidů dusíku a oxidu uhelnatého. Právě oxidy síry, přesněji oxid siřičitý je jedním z hlavních znečišťovatelů životního prostředí. U lidí mohou vysoké koncentrace oxidu siřičitého vyvolat vážné poškození plic a dýchacích cest. Je také považován za hlavní plyn podílející se na kyselých srážkách, které vedli koncem 20. století k likvidaci některých lesních porostů na území ČR. K razantnímu poklesu jeho emisí (téměř o 85% v porovnání let 1990 a 2006) došlo v 90. letech díky instalaci odsiřovacích zařízení a odlučovačů popílku, rekonstrukcí kotelních zařízení apod. Proces termického zpracování fosilních paliv se musí řídit přísnými zákony a legislativními předpisy.

Bakalářská práce se zabývá polosuchou metodou čištění spalin pomocí pračky PV-F800. Posudek na toto zařízení vypracovala katedra energetiky, odkud byly převzaty i veškeré technické parametry zařízení. Pomocí vypočtených hodnot (objemové množství spalin, spotřeba sorbentu) je zhodnoceno, zda je možné zařadit pračku spalin do kotlen na spalování hnědého uhlí.



## 2 KOTLE NA SPALOVÁNÍ TUHÝCH PALIV

Pro různé spalovací kotle je z hlediska konstrukce a výkonu vyráběno několik druhů roštů. Na každý kotel jsou kladeny různé požadavky a proto musí těmto požadavkům odpovídat jak tvarem, tak svou velikostí. Zapojení, konstrukce a některá příslušenství se trochu liší u kotlů menších a vyšších výkonů. [1]

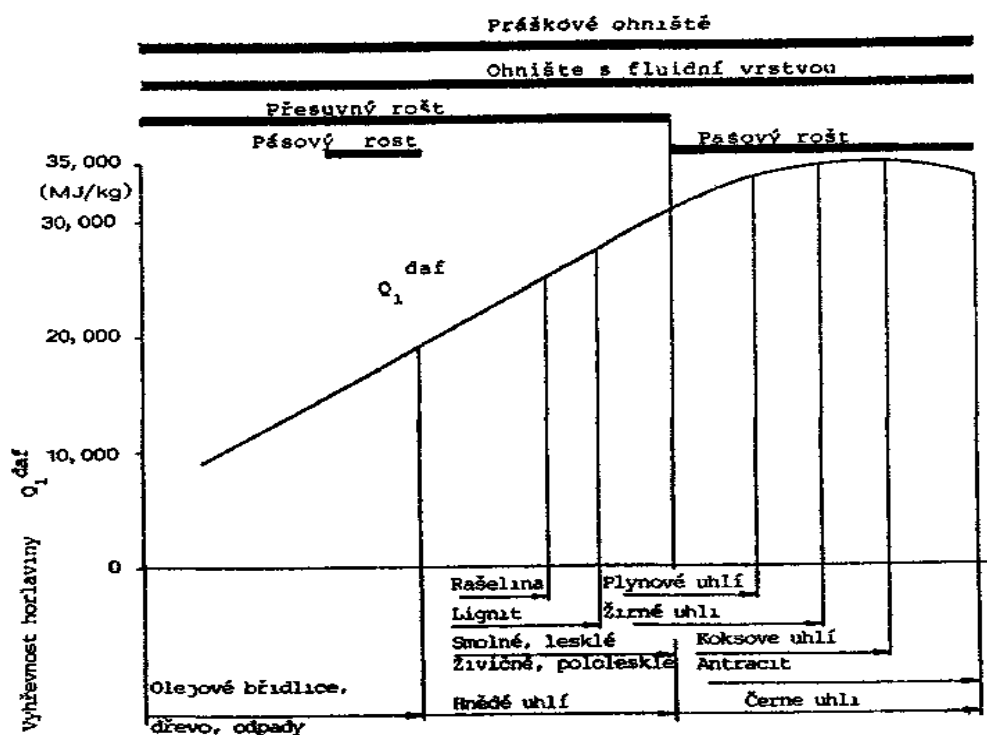
**Ohniště mohou být:**

- Roštové
- Práškové
- Fluidní

Při volbě typu ohniště se musíme řídit podle určitých kritérií, jako jsou vlastnosti paliva – tím rozumíme jeho složení, fyzikální a chemické vlastnosti a vlastnosti popelovin. Dále se zaměříme na výkon kotle:

- od 0,25 MWt – cca 150 MWt se používají mechanické roštové ohniště
- od 40 MWt až po nejvyšší výkony jsou to prášková ohniště
- od 40 MWt do cca 750 MWt jsou to cirkulující fluidní vrstvy

Obr. 2.1, Rozsah použitelnosti ohnišť



Ve své práci se zaměřím na roštové kotle spalující hnědé uhlí.

Z hlediska funkce kotle a jeho obsluhy můžeme roštové kotle rozdělit na:

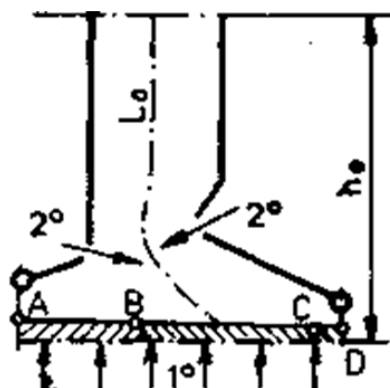
- *kotle s pevným roštem*
- *kotle s mechanickým roštem*

Kotle s pevným roštem se používají pro menší výkony, kotle s mechanickým roštem pro větší výkony a dále se dělí dle typu roštu:

- *pásový rošt*
- *přesuvný rošt*
- *vratisuvný rošt*

Tvar roštového ohniště při spalování hnědého uhlí a lignitu vidíme na obrázku 2.2, spalování probíhá ve dvou ohništích.

Obr. 2.2, tvar roštového ohniště



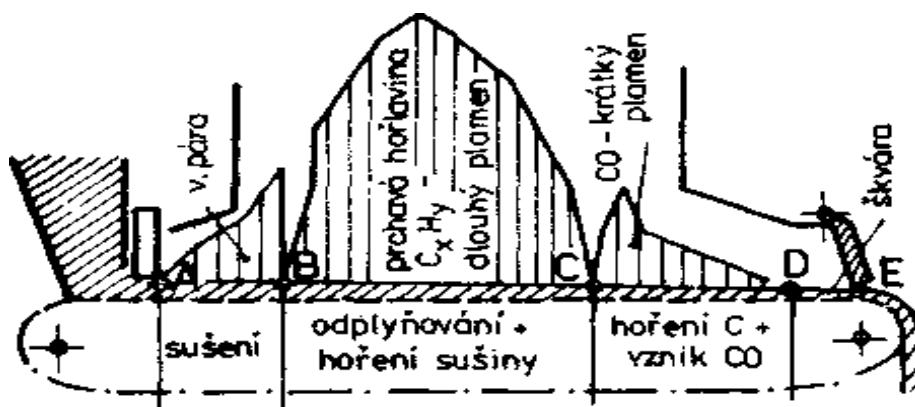
Pro mou práci mám zadán výkon kotle 1,5 MW<sub>t</sub>, vybral jsem si tedy kotel s mechanickým roštem, což znamená, že vyhořelé zbytky po spalování se odstraňují mechanicky. V ohništi se palivo posouvá nebo pohrabuje a postupně dohořívá.

## 2.1 Účinná plocha roštu

Tato plocha slouží k uvolňování tepla z paliva, zbývající plocha slouží k přípravě paliva pro zapálení a pro dohořívání. S rostoucím obsahem vody v palivu nebo při nižší teplotě spalovacího vzduchu bude klesat poměr účinné plochy roštu k celkové ploše. S tím souvisí střední měrný tepelný výkon roštu  $q_r$  [kW/m<sup>2</sup>], protože čím vyšší obsah vody bude mít palivo, tím nižší  $q_r$  musíme zvolit.

Spalování na roštu může probíhat ve dvou případech. V prvním případě je spalování ve vrstvě na roštu, kdy pevnou hořlavinou je tuhý uhlík. V druhém případě probíhá spalování v prostoru nad vrstvou paliva, na začátku roštu uhlovodíky a v další části CO. Průběh spalování vidíme na obrázku 2.3.

Obr 2.3, Průběh spalování na roštu



Dle přívodu tepla k vysušení a vznícení paliva můžeme roštová ohniště dělit:

- se spodním zápalem
- s horním zápalem
- s oboustranným zápalem

### Části roštového ohniště

Mezi základní části roštového ohniště patří:

- rošt s palivovou násypkou, hradítkem a škvárovou výsypkou
- spalovací prostor vymezený stěnami
- zařízení pro přívod spalovacího vzduchu

Základní části roštu jsou roštnice, nosná konstrukce a u mechanických roštů ještě hnací ústrojí.

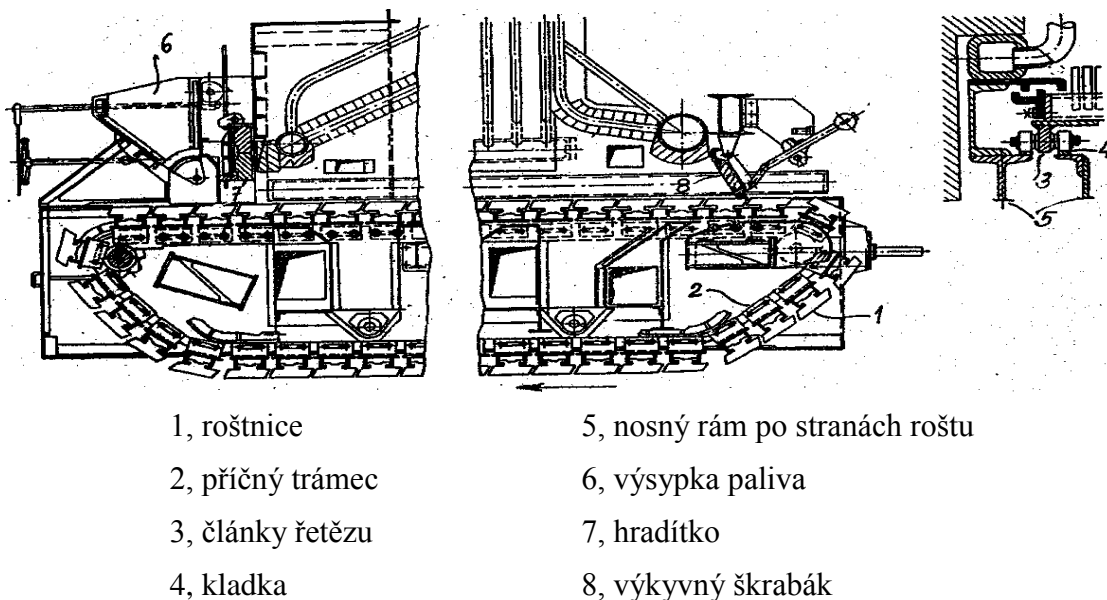
## Funkce roštu

- zajišťovat co nejmenší propad a úlet paliva a zároveň udržovat požadovanou tloušťku vrstvy paliva
- spalovací vzduch musí být přiváděn tak, aby proces spalování probíhal s optimálním přebytkem vzduchu
- umožňovat postupné vysoušení, zahřátí na zápalnou teplotu, hoření a dokonalé vyhoření všech zrn paliva
- shromažďovat, popřípadě zajišťovat odvod tuhých zbytků po spalování
- regulovat tepelný výkon kotle dle požadovaného výkonu kotle

## 2.2 Pásový rošt

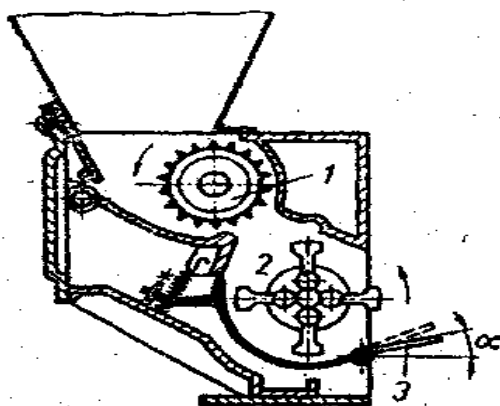
Na obrázku 2.4 můžeme vidět *pásový rošt bez pohazování* paliva a jeho součásti. Jedná se o jeden z nejrozšířenějších typů mechanických roštů, který vznikl jako modifikace řetězového roštu. Jeho hlavní nevýhodou bylo to, že pokud se poškodila roštnice, musel se rozebrat celý řetěz.

Obr. 2.4, Pásový rošt bez pohazování paliva



Pro spalování uhlí, které má větší obsah prachu je vhodné použít *pásový rošt s pohazováním*. Zařízení pro pohazování paliva je pod výsypkou uhlí a provádí se mechanicky, pneumaticky nebo parou.

Obr. 2.5, Mechanický pohazovač



### Mechanický pohazovač

- 1, Podavač
- 2, Pohazovač
- 3, Usměrňovací deska

## 2.3 Vratisuvný rošt

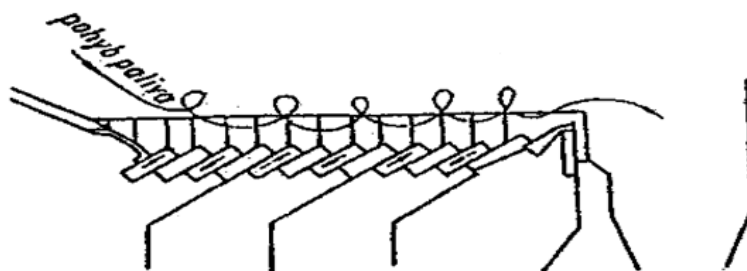
U tohoto typu roštu se dosahuje daleko většího promíchání paliva ve vrstvě a roštnice se pohybují proti směru toku paliva. Jsou dva základní druhy vratisuvných roštů:

- Kaskádový
- Martin

### 2.3.1 Kaskádový

Tento typ roštu má vodorovný povrch. Palivo na něm stráví kratší čas a promíchává se v příčném směru. Kaskádový rošt je znázorněn na obrázku 2.6.

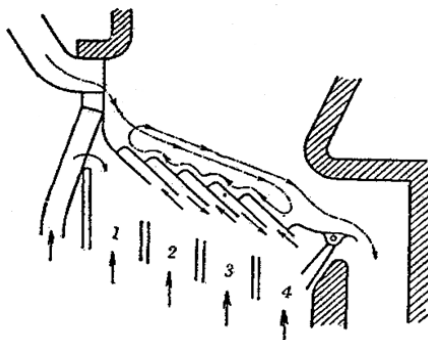
Obr 2.6, Kaskádový Vratisuvný rošt



### 2.3.2 Martin

Rošt je skloněný ve směru od vstupu paliva k výsypce. Doba setrvání paliva na roštu je dlouhá. Dosáhne se dobrého promíchání a prohoření, je znázorněn na obrázku 2.7.

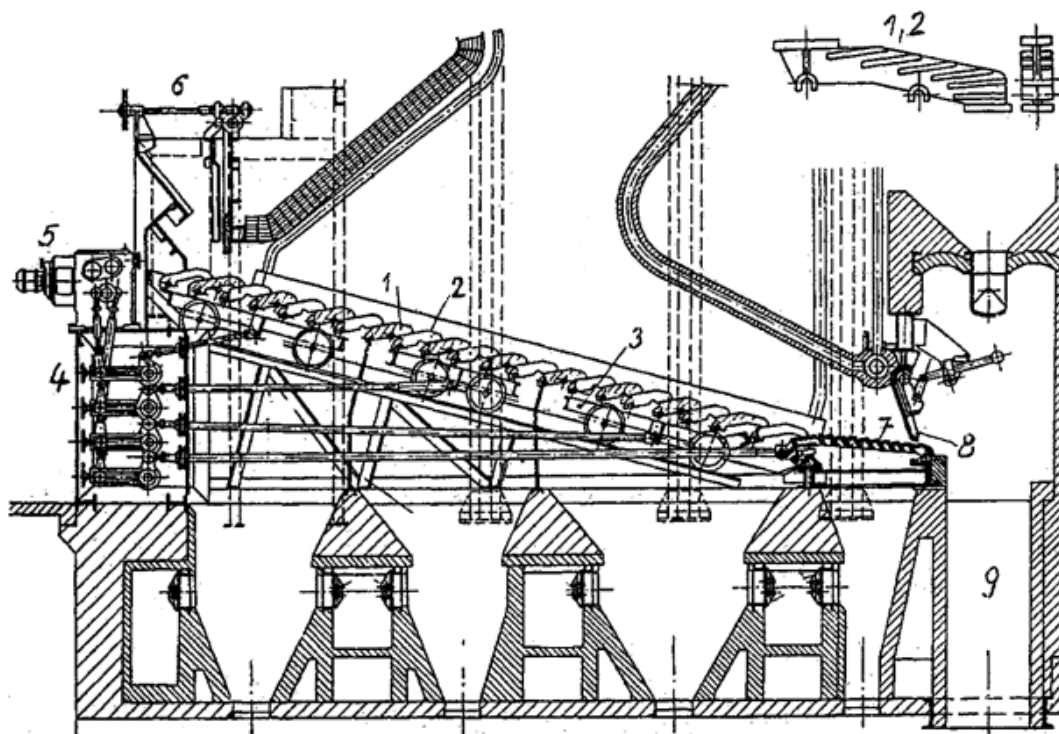
Obr. 2.7, Vratisuvný rošt Martin



### 2.4 Přesuvný rošt

Tento typ je vhodný pro spalování uhlí s velkým obsahem prachu a také pro uhlí, které se spéká. Přesuvný rošt je znázorněn na obrázku 2.8. [2]

Obr 2.8, Přesuvný rošt



**Části přesuvného roštu:**

- 1, pevné roštnice
- 2, pohyblivé roštnice
- 3, pohyblivé vozíky
- 4, klikový mechanismus
- 5, elektromotor
- 6, palivová výsypka
- 7, vodorovný dohořívací rošt
- 8, výkyvný škrabák
- 9, škvárová výsypka

### 3 TVORBA A EMISE ŠKODLIVIN PŘI SPALOVÁNÍ UHLÍ [3]

Při spalování uhlí a celkově všech fosilních paliv vzniká mnoho škodlivých látek znečišťujících ovzduší. Energetická zařízení, která tyto paliva spalují, musí být proto řešena tak, aby koncentrace škodlivin nepřekročovaly limitní hodnoty, které určuje zákon o ochraně ovzduší.

Škodliviny vznikající při spalovacím procesu můžeme rozdělit do 3 skupin:

- Do první skupiny patří zejména  $\text{SO}_2$ , Cl, F, tuhé částice a toxické kovy. Jsou to škodliviny, jejichž emise jsou dány složením uhlí a dají se jen minimálně nebo vůbec omezit kvalitou spalování.
- V druhé skupině jsou škodliviny, které vznikají v průběhu spalovacího procesu, tudíž je můžeme omezit kvalitou spalování ať už jen částečně nebo úplně. Jsou to oxid uhelnatý a oxidy dusíku. Emise oxidu uhelnatého mohou dosahovat až několika procent.
- Třetí skupina je tvořena oxidem uhličitým, který vzniká spalováním fosilních paliv, protože jejich hlavní složkou je uhlík. Je mnoho těch, kteří považují oxid uhličitý za škodlivou látku, protože má vliv na tvorbu skleníkového efektu, oficiálně ke škodlivinám ale nepatří.

#### 3.1 Tuhé částice

Vznik tuhých částic může při spalování ovlivnit mnoho faktorů, jako druh spalovacího zařízení, spalované palivo, způsob vedení spalovacího procesu apod. Hlavní vliv na vznik tuhých exhalátů ve formě popílku až aerosolů má zrnitost uhlí. Roštové kotle byly předurčeny ke spalování tříděného uhlí, aby se docílilo všech důležitých funkcí spalovacího procesu. V energetice je ale tříděného paliva nedostatek a to způsobuje, že spalování musí probíhat s přebytkem vzduchu, protože palivo obsahuje velký podíl jemných frakcí. Celý tento proces pak znamená, že velká část jemných frakcí únosem odchází z ohniště.



## 3.2 Oxidy síry

Vznik oxidů síry je dán složením paliva. Minimálně můžeme jejich tvorbu omezit vhodným řízením spalovacího procesu. Při spalování se teoreticky veškerá síra obsažená v uhlí spálí na oxid siřičitý. Pro zajímavost, z 1 kg síry dostaneme 2 kg oxidu siřičitého

Snížit emise oxidů síry je možné 2 způsoby:

- *úprava paliva před spalovacím procesem*
- *odstranění oxidů síry ze spalin*

První metoda je méně rozšířená. Jedním ze způsobů je například odstranění síry z paliva vlivem zkrápění loužící vodou, přičemž se extrahují vodou rozpustné látky a oxiduje se pyrit. Oxidace pyritu probíhá za katalytického účinku sirných a železitých bakterií přítomných v loužící vodě. Touto metodou můžeme odstranit až 50% obsahu síry v palivu. Nevýhodou je vysoká spotřeba loužící vody a délka procesu, která dosahuje až několik desítek dní.

Procesy odsiřování spalin jsou mnohem používanější. Podle způsobu zachycování oxidu siřičitého na absorbent je možné rozdělit technologie na *regenerační* a *neregenerační, mokré, polosuché, suché* (viz kapitola 4).

Výhody odsiřovacích procesů jsou následující:

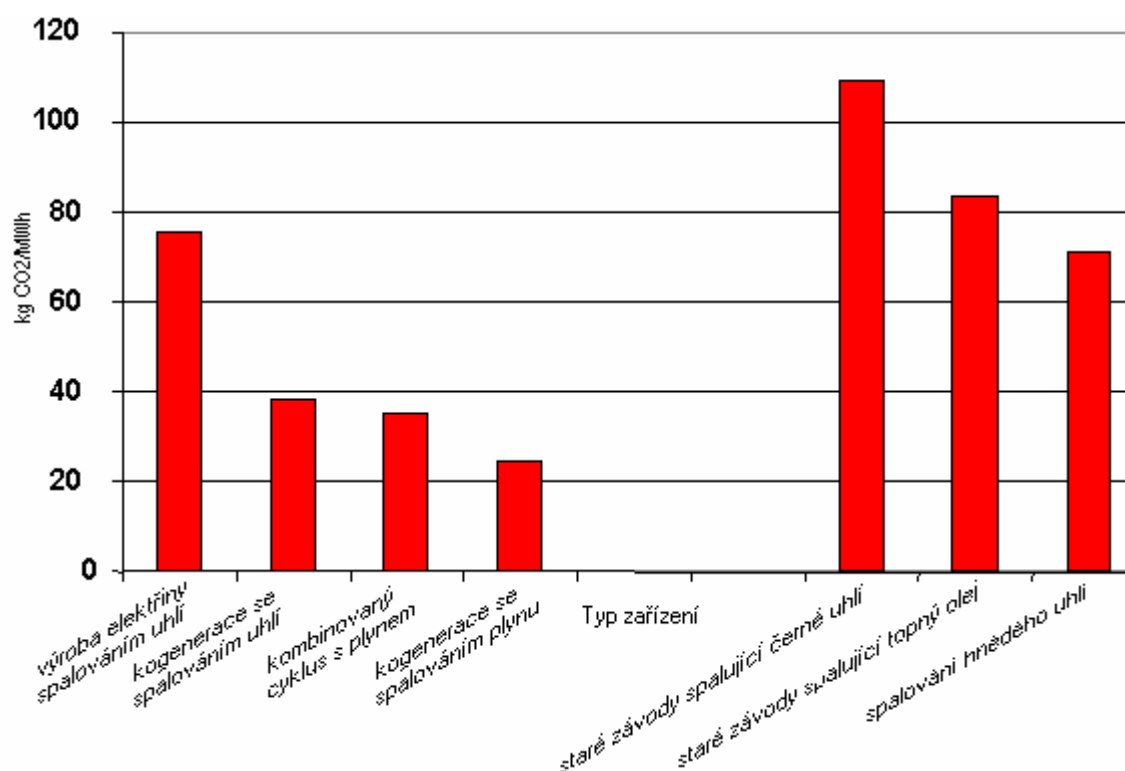
- možnost použití u nových i existujících zařízení
- většinou jsou umísťovány na konci procesu, neovlivňují tedy spalovací proces
- na odsiření nemá významný podíl složení paliva

## 3.3 Oxid uhličitý

Oxid uhličitý je bezbarvý plyn, který je těžší než vzduch a vzniká reakcí uhlíku s kyslíkem podle rovnice:  $C + O_2 \rightarrow CO_2$

Oxid uhličitý má bezpochyby mnoho odpůrců, ale i těch, kteří ho považují za plyn, díky němuž vůbec můžeme žít. Použití  $CO_2$  je v mnoha oblastech průmyslu – chemický, potravinářský, při zpracování kovů apod. V každém případě je oxid uhličitý významnou součástí života na zemi a dlouho budou jeho klady a zápory tématem mnoha diskuzí.

Obr 3.1, Vypouštění CO<sub>2</sub> pro různé druhy spalovacích zařízení [4]



Tab. 1, Emise oxidu uhličitého při spalování fosilních paliv

Palivo	t CO <sub>2</sub> / t paliva	kg CO <sub>2</sub> / GJ
Hnědé uhlí energetické (SHD)	1,139	100,6
Hnědé uhlí tříděné (SHD)	1,542	87,6
Černé uhlí tříděné	2,250	77,8
LTO, mot. Nafta	3,172	75,2
Benzin	3,110	72,1
Zemní plyn	1,980	59,4

Cílem snížení emisí oxidu uhličitého je hlavně omezit účinky skleníkového efektu, který zvyšuje teplotu na zemském povrchu.

Množství  $\text{CO}_2$  vypouštěné do ovzduší lze snížit:

- nižším obsahem uhlíku ve spalovaném palivu
- získáváním potřebné energie ze spalování biomasy namísto fosilních paliv
- snížením spotřeby energie, vyráběné spalováním fosilních paliv

### 3.4 Oxidy dusíku

Vznik těchto škodlivin je hodně závislý na kvalitě spalovacího procesu. Při spalování uhlí, ale i všech fosilních paliv vzniká několik oxidů dusíku a těmi hlavními jsou:

- *oxid dusnatý*  $\text{NO}$
- *oxid dusičitý*  $\text{NO}_2$
- *oxid dusný*  $\text{N}_2\text{O}$

Oxid dusnatý a oxid dusičitý jsou směsné formace  $\text{NO}_x$ . Tvorba  $\text{NO}_x$  se řídí třemi zásadními mechanismy, které jsou charakteristické původem dusíku a prostředím, kde reakce probíhá:

- tepelný  $\text{NO}$  pochází z reakce mezi  $\text{O}_2$  a  $\text{N}$  ze vzduchu
- palivový  $\text{NO}$  se tvoří z dusíku obsaženého v palivu
- okamžitý  $\text{NO}$  vzniká přeměnou molekulárního dusíku v přední části plamene za přítomnosti meziproduktů uhlovodíkových sloučenin. [4]

### 3.5 Emisní faktory

Stanovení průměrné emisní koncentrace škodliviny je možné pouze na základě výsledků kontinuálních měření. Pro rychlé stanovení množství emisí bez měření je možné použít tzv. emisního faktoru. Přesnost stanovení je v toleranci 30 – 60% a jedná se tedy pouze o orientační hodnotu. [citace]

Tab. 2, Emisní faktory pro spalování uhlí

Typ ohniště	Tuhé emise	SO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>
<b>Granulační</b>	8,5 A <sup>r</sup>	19 S <sup>r</sup>	0,5	9,0	0,15
<b>Výtavné</b>	5,5 A <sup>r</sup>	19 S <sup>r</sup>	0,5	15,0	0,15
<b>Cyklonové</b>	1,5 A <sup>r</sup>	19 S <sup>r</sup>	0,5	27,5	0,15
<b>Pásový rošt s pohazovačem</b>	5,0 A <sup>r</sup>	19 S <sup>r</sup>	1,0	7,5	0,5
<b>Pásový rošt – HU</b>	1,9 A <sup>r</sup>	19 S <sup>r</sup>	1,0	7,5	0,5
<b>Pásový rošt – ČU</b>	1,7 A <sup>r</sup>	19 S <sup>r</sup>	1,0	7,5	0,5
<b>Pevný Rošt</b>	1,0 A <sup>r</sup>	19 S <sup>r</sup>	45,0	1,5	10

## 4 METODY ČIŠTĚNÍ SPALIN

V odsiřovacích procesech dochází k odstranění  $\text{SO}_2$  i škodlivin kyselého charakteru, tedy chlorovodíku  $\text{HCl}$  a fluorovodíku  $\text{HF}$ .

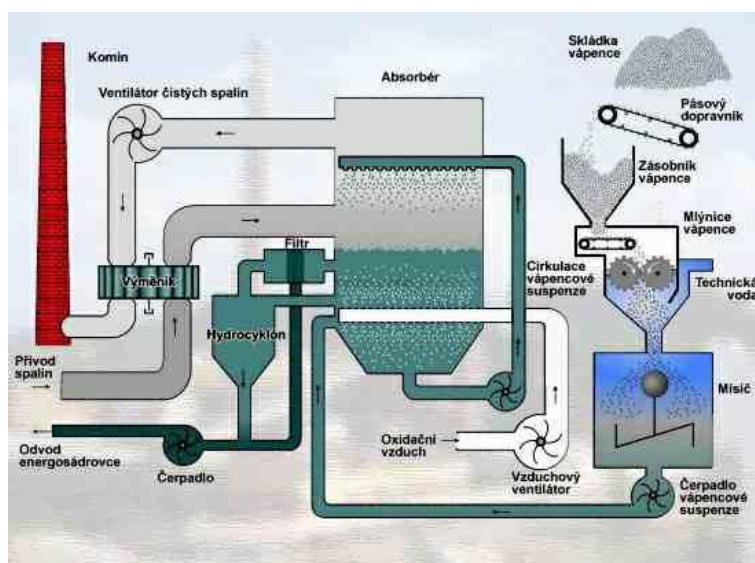
### *Odsiřovací metody podle způsobů zachycování SO<sub>2</sub>:*

- **regenerační** - aktivní látka se po reakci s oxidem siřičitým regeneruje a vrací zpět do procesu, oxid siřičitý se dále zpracovává
- **neregenerační** - aktivní látka reaguje s  $\text{SO}_2$  na dále využitelný nebo nevyužitelný produkt a zpět do procesu se nevrací
- **mokrý** -  $\text{SO}_2$  se zachycuje v kapalině nebo vodní suspenzi aktivní látky
- **polosuchý** - aktivní látka je ve formě vodní suspenze vstříkována do proudu horkých spalin, kapalina se poté odpaří a produkt reakce se zachycuje v tuhém stavu
- **suchý** -  $\text{SO}_2$  reaguje s aktivní látkou v tuhém stavu [citace]

## 4.1 Mokrý způsob čištění spalin

Tento způsob čištění spalin je nejrozšířenějším nejen v Evropě, ale i v USA a Japonsku. Oxid siřičitý se zachycuje vodní suspenzí jemně mletého vápence. Výhodou je vysoká činnost zachycení  $\text{SO}_2$ , která je až 96%. Produktem odsiření je hydrát síranu vápenatého  $\text{CaCO}_3 \cdot x \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , tzv. energosádrovec, který je dále využitelný například ve stavebnictví. Zcela nahrazuje sádrovec přírodní.

*Obr. 4.1 Schéma odsiření mokrou vápencovou cestou*



Plynný oxid siřičitý obsažený ve spalínách je vypírán vodní vápencovou suspenzí ( $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ ). Vzniká roztok hydrogensiřičitanu vápenatého  $\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$ . Tento proces lze vyjádřit dle rovnice:



Ve vodní suspenzi odsiřovacího zařízení se musí udržovat kyselé prostředí s pH okolo 3,5 – 5. To nám zaručí, že výsledným produktem odsíření bude žádoucí energosádrovec, který je velmi čistý, protože se jedná o krystalizaci z roztoku.

#### 4.1.1 Technologický proces odsiřování

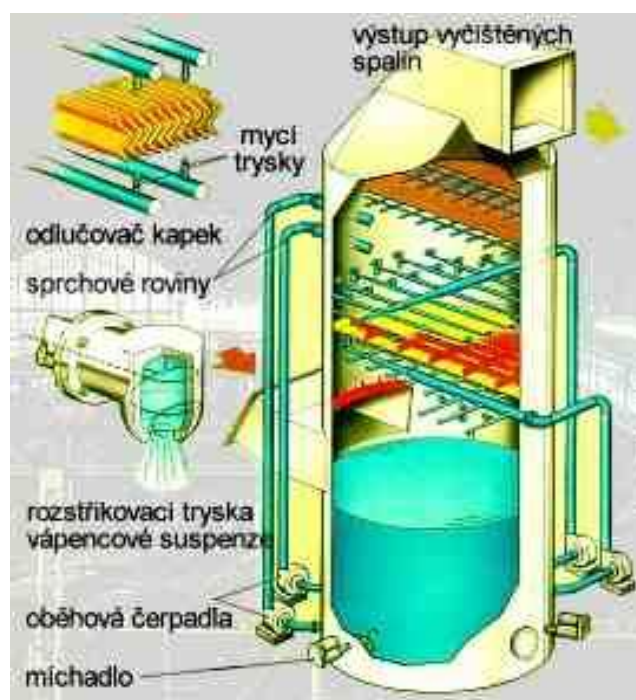
Spaliny odchází z kotle do elektrostatického odlučovače. V odlučovači jsou zbaveny popílku a poté vstupují do odsiřovacího zařízení – absorberu. V horní části absorberu jsou 3 – 4 sprchové roviny, ve spodní části je jímka absorpční suspenze, která zaujímá asi jednu pětinu celkové výšky absorberu. Absorpční zónou nazýváme střední část absorberu.

Sprchová rovina je horizontální potrubní síť, která je opatřena různým množstvím speciálních trysek. Tryskami se po ploše absorberu rozstříkuje absorpční činidlo vápencové suspenze. Aby se dosáhlo snadné reakce suspenze a oxidu siřičitého, musí být trysky konstruovány tak, aby kapičky rozstříkované suspenze byly co nejmenší.

Spaliny vstupují do absorberu ve spodní části. Přes absorpční zónu dále postupují ke sprchovým rovinám, kde jsou kroupeny vápencovou suspenzí. Kapičky suspenze přicházejí do styku se spaliny a absorbují oxid siřičitý. Reakcí vápencové suspenze a  $\text{SO}_2$  vznikne suspenze siřičitanu vápenatého, která se zachycuje v jímce absorberu. Do vzniklé suspenze je vháněn oxidační vzduch a tím dochází k oxidaci siřičitanu na síran vápenatý a následně ke krystalizaci sádrovce.

Do absorberu vstupují spaliny s teplotou cca 130 – 160 °C a po ochlazení vápencovou suspenzí je jejich teplota okolo 60 °C. Poté jsou spaliny zavedeny buď do chladících věží, nebo do komínů a vypouštěny do ovzduší. Technologický proces mokrého způsobu čištění spalin vidíme na obrázku 4.2.

Obr. 4.2 Technologický proces mokré metody



V horní části absorbéru jsou umístěny odlučovače kapek, které zachycují kapičky vápencové a sádrovcové suspenze. Aby se docílilo lepšího rozptýlení spalin při vstupu do atmosféry, jsou spaliny před zavedením do komína ohřívány na 80 – 90 °C s využitím tepla odebraného spalinám před vstupem do absorbéru.

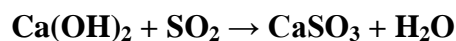
Kvůli komplikovanosti zařízení na ohřev spalin se stalo perspektivním řešením zavedení vyčištěných spalin do chladících věží. Chladicí věž ochladí vodu, ohřátou a použitou během procesu. Poté jí vrátí zpět do cyklu. Používají se věže s přirozeným tahem. [6]

Schéma zařízení mokré metody čištění spalin je v příloze A.

## 4.2 Polosuchý proces čištění spalin

Způsob polosuchého čištění není tak perspektivní jako mokrá vápencová metoda. Například skupina ČEZ využívá tohoto způsobu pouze v elektrárně Ledvice.

U této metody se do reaktoru, jímž je rozprašovací sušárna vstříkují vodní suspenze vápna. Při kontaktu spalin a suspenze dochází k odpaření vody ze suspenze a spaliny se ochladí na optimální teplotu reakce dle chemické rovnice:

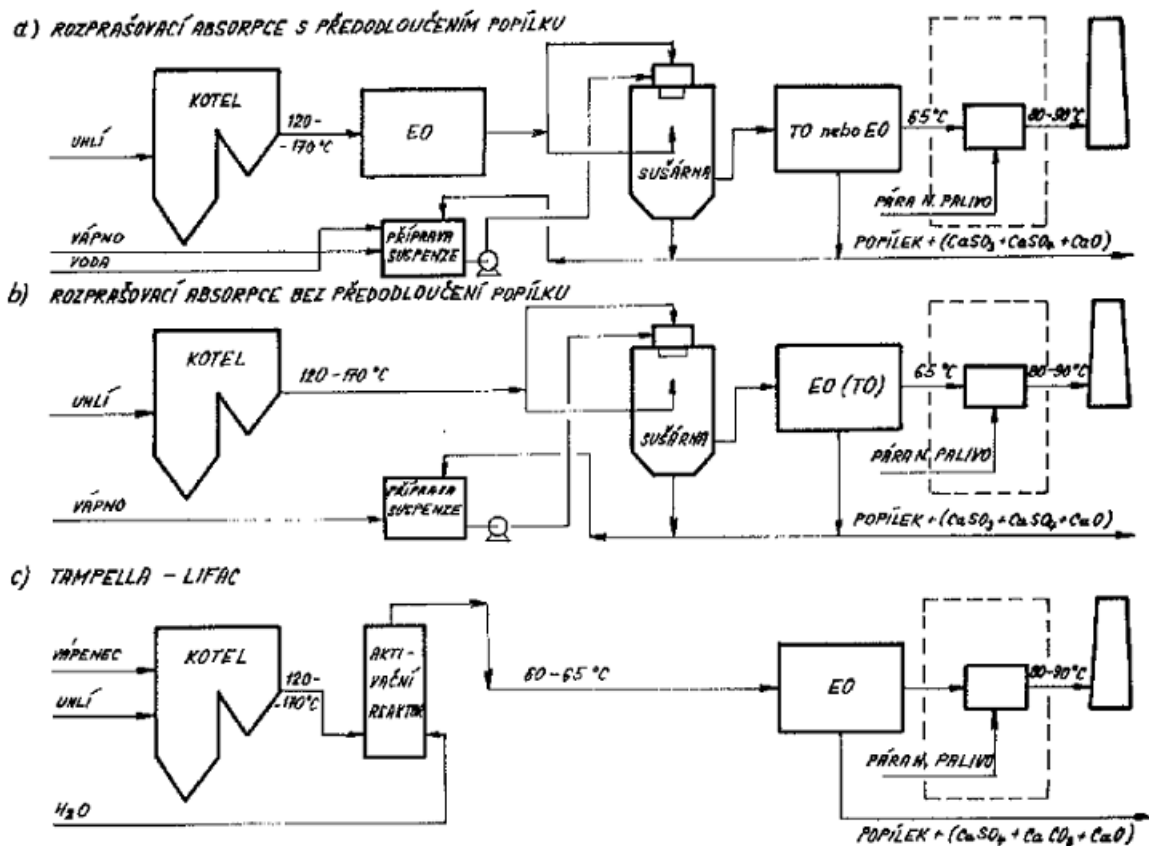


Oxidací se tvoří i menší množství síranu:



Proces polosuchého čištění můžeme realizovat ve 3 variantách, viz obrázek 4.3.

Obr 4.3, proces polosuchého čištění spalin





#### **4.2.1 Rozprašovací absorpce s předodloučením popílku**

Spaliny vystupují z kotle při teplotě 120 – 170 °C a před vstupem do sušárny jsou nejprve odprášeny v elektrostatickém odlučovači. V sušárně přichází do kontaktu s vápennou suspenzí, která se připravuje vyhašením vápna vodou v samostatné nádrži. Odpařením vody ze suspenze v sušárně vznikne pevný produkt odváděný ve spodním díle sušárny a dílem odchází do tkaninového, popřípadě elektrostatického odlučovače. Spaliny jsou po ohřátí na teplotu okolo 80 – 90 °C vypouštěny komínem. Jak je již uvedeno dříve, spaliny se před vypouštěním ohřívají, aby se lépe rozptýlily v ovzduší.

#### **4.2.2 Rozprašovací absorpce bez předodloučení popílku**

Tato varianta je v podstatě stejná, jako předchozí. Rozdíl je v tom, že spaliny vystupující z kotle jsou přiváděny do sušárny včetně neodloučeného popílku. V sušárně přicházejí spaliny opět do kontaktu s vápennou suspenzí. Část produktu se recirkuluje.

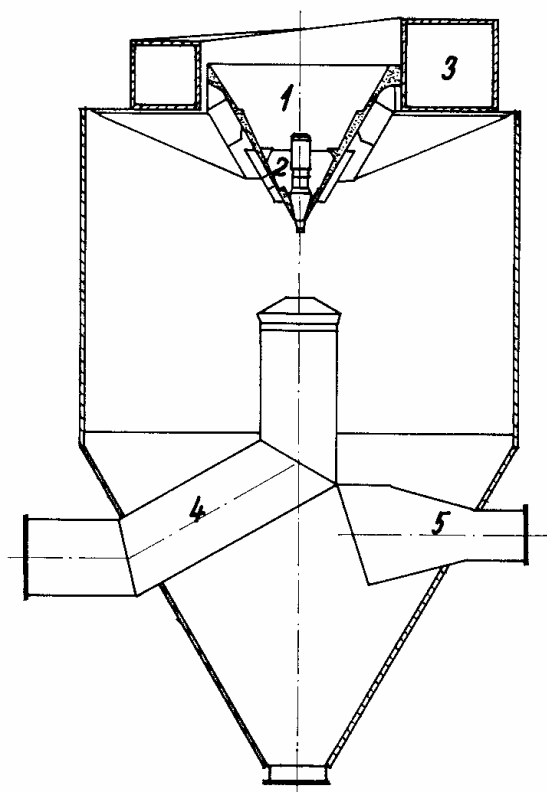
#### **4.2.3 Tampella – Lifac**

Třetí varianta představuje hybrid suché vápencové aditivní technologie a polosuché vápencové metody. Do kotle se nastříkuje vápenec, který kalcinuje a částečně zachycuje oxid siřičitý. Aby se dosáhlo optimální teploty spalin pro odsíření, ochlazují se spaliny v reaktoru nástřikem vody. Produkt odsíření se stejně jako v předchozích případech odloučí v tkaninovém, popřípadě elektrostatickém odlučovači. Spaliny se po přehřátí (teplota cca 80 - 90°C) odvádějí do komína.

#### **4.2.4 Reaktor pro polosuchý způsob odsiřování**

Materiál reaktorů je obvykle konstrukční ocel. Polyesterovými nátěry uvnitř reaktoru se zabrání vzniku koroze. Na obrázku 4.5 vidíme reaktor pro polosuchý vápenný způsob čištění spalin.

Obr 4.5, Reaktor pro polosuchý vápenný způsob odsiřování



**Základní části reaktoru:**

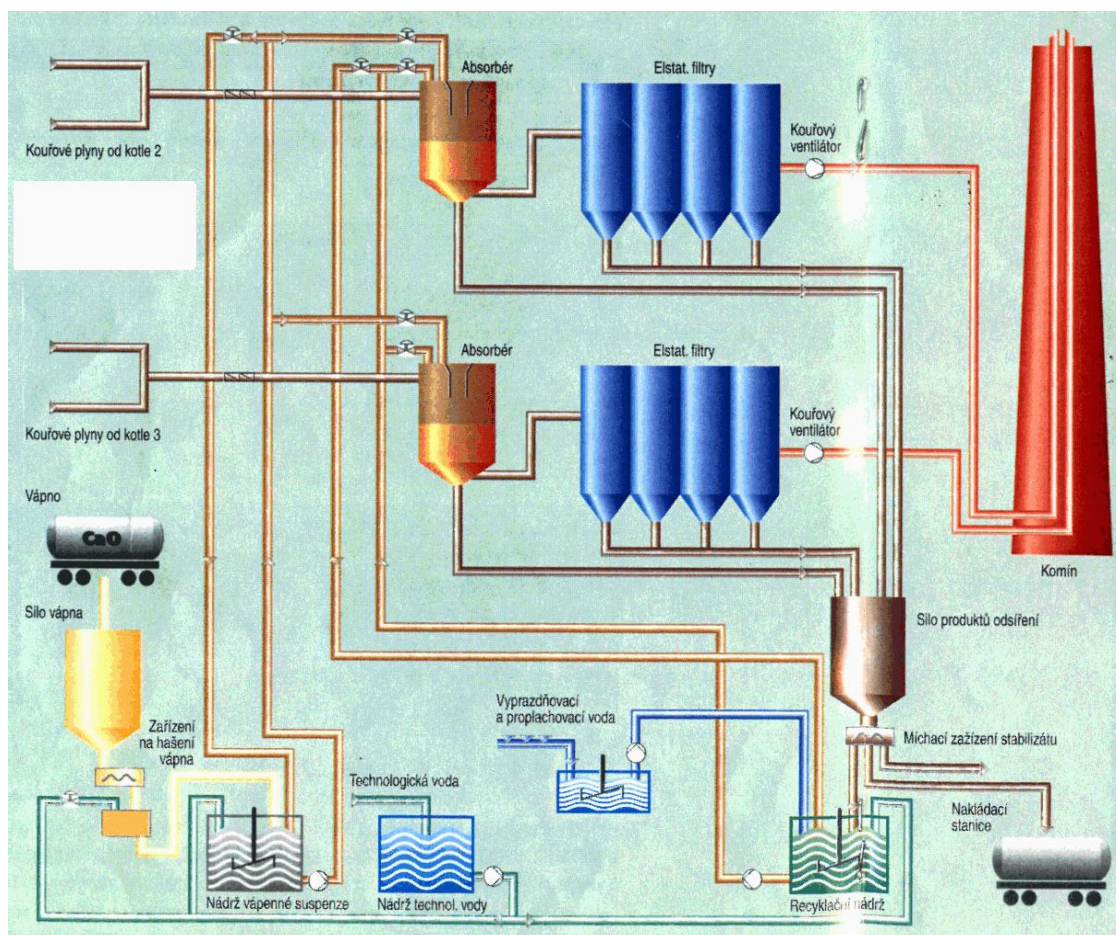
- 1, Rozprašovací sušárna
- 2, Rotující kotouč
- 3, Hlava reaktoru
- 4, Spodní přívod spalin
- 5, Odvod spalin

Pomocí rotujícího kotouče s otvory se dosáhne kontaktu spalin a suspenze. Otvory v kotouči se suspenze nastříkuje. Spaliny se do reaktoru přivádějí hlavou reaktoru (okolo 85 %) a spodním dílem (okolo 15 %). Hlavním důvodem, proč se spaliny přivádějí i spodním dílem je docílení vyšší turbulence spalin v reaktoru. Tím dosáhneme intenzivnějšího odpaření vody ze suspenze. Rotující kotouč je vyroben ze speciálních chromniklových slitin. Pohání ho elektromotor při otáčkách 4 – 6 tisíc za minutu. Kapičky suspenze mají velikost okolo 20  $\mu\text{m}$ .

Reaktory mohou být konstruovány i jinými způsoby. Například koncepce reaktoru s dvoufázovými tryskami suspenze – vzduch. U těchto reaktorů není potřebný spodní přívod spalin. Využívají se v elektrárně Ledvice. Na obrázku 4.6 je znázorněn Polosuchý vápenný způsob odsíření spalin v elektrárně Ledvice. Pro odpar suspenze se používá rotující kotouč. Na rozdíl od mokré metody je problém s využitím produktu odsíření. Obvyklé složení je uvedeno v tabulce 3. Výsledný produkt má vysoký obsah CaO a ve směsi s popílkem má vlastnosti chudé maltoviny. Vhodné využití produktu je při stavbě dna a stěn skládek komunálního odpadu. [7]

Schéma zařízení polosuché metody čištění spalin je v příloze A.

*Obr. 39, Polosuchý vápenný způsob odsíření spalin v elektrárně Ledvice [7]*



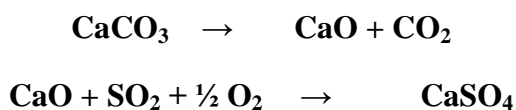
Tabulka 3, obvyklé složení produktu polosuché vápenné metody odsíření spalin [7]

<b>Látka</b>	<b>Složení (bez odloučení popílku), [% hm.]</b>	<b>Složení (s odloučením popílku), [% hm.]</b>
<b>Popílek</b>	47,0	0,7
<b>H<sub>2</sub>O volná</b>	3,0	2,9
<b>H<sub>2</sub>O krystalově vázaná</b>	4,2	8,9
<b>CaSO<sub>3</sub></b>	25,0	52,7
<b>CaSO<sub>4</sub></b>	6,8	14,3
<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>	9,5	12,3
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	0,9	1,5
<b>CaF<sub>2</sub></b>	0,3	0,6
<b>CaCl<sub>2</sub></b>	0,9	1,9

### 4.3 Suchý proces čištění spalin

Spaliny jsou z kotle vedeny do reaktoru. Suchou aktivní látkou je jemně mletý vápenec, který je vháněn do proudu spalin. Škodliviny kyselého charakteru (HF, HCl) reagují na povrchu pevných částic za vzniku fluoridů a chloridů.

Při procesu probíhají reakce:



Suché produkty se zachycují na tkaninovém filtru. Nevýhodou je vznik velkého množství tuhých emisí. Jen stěží lze dosáhnout předepsaných emisních hodnot. Taktéž účinnost této metody je minimální, proto je tento proces čištění spalin téměř nevyužitelný.

Schéma zařízení suché metody čištění spalin je v příloze A.

## 5 NÁVRH ZAŘÍZENÍ NA ČIŠTĚNÍ SPALIN

Pro svou práci jsem si zvolil pračku spalín typu PV – F800 od firmy Fornax a.s., která využívá princip vypírky spalín polosuchou metodou.

### 5.1 Charakteristika pračky

Pračka je vhodná pro čištění spalín ze spaloven odpadů a z kotelen na tuhá a kapalná paliva. Jsou zaměřeny na čištění spalín na bázi  $\text{SO}_2$ , oxidů těžkých kovů,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$  a také dioxinů a furanů. Pokud jsou spaliny hodně znečištěné, je možnost zařadit do série dvě pračky. Dosáhneme tím větší účinnosti vypírky. Součástí každého zařízení je nádrž na sorbent. Je opatřena dávkovacími čerpadly a míchadlem.

Hlavními přednostmi tohoto zařízení jsou:

- Snížení obsahu  $\text{SO}_2$ , oxidů těžkých kovů,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$  a také dioxinů a furanů
- Odstranění prachových částic tkaninovým filtrem, který je součástí technologie
- Neprodukuje žádné odpadní vody
- Relativně nízké investiční náklady
- Vysoká spolehlivost
- Jednoduchá údržba
- Minimální spotřeba náhradních dílů [10]

Pro nouzovou ochranu filtrační tkaniny slouží přísávací klapka studeného vzduchu, která je umístěna na výstupním kouřovodu mezi pračkou a filtrem. Kouřovody, kterými v celém procesu proudí spaliny, jsou vyrobeny z ocelových svařenců.

Doprava sorbentu do nádrže i jeho příprava je jeden samostatný celek. Je vybaven ovládacím panelem a základní regulace je řízena v závislosti na teplotě spalín na vstupu a výstupu. Vstupní teplota je snímána pro všechny reaktory společně. Teplota na výstupu se snímá pro každý reaktor zvlášť.

Tabulka 4, Souhrn technických údajů polosuché pračky spalín typu PV-F 800

Typ zařízení		PV-F 800
Objem spalín min-max	Nm <sup>3</sup> /s	0,4 - 2
Teplota spalín na vstupu	°C	170 - 280
Výstupní teplota spalín	°C	120 - 240
Max.spotřeba sorbentu	l/hod	130
Sorbent Ca(OH) <sub>2</sub> :H <sub>2</sub> O		1:4
Účinnost vypírky	Vápenný hydrát	>90 %
	Vapecarb	>95 %

**Pračka spalín má 13 hlavních částí:**

1. Reaktoru
2. Dosoušecí komory
3. Vstupního kouřovodu
4. Tří tlakových trysek
5. Rozvodu stlačeného vzduchu
6. Zásobníku vápna
7. Míchací nádrže
8. Dávkovací nádrže
9. Rozvodu užitkové vody
10. Čidel vstupní a výstupní teploty spalín
11. Dávkovacích čerpadel sorbentu DČ 1 – 3
12. Ventilů automatického proplachu potrubí sorbentu EV 1, 2
13. Elektrorozvaděče

Pračka pracuje na vstupu při teplotách 230 – 250 °C. Spaliny jsou vedeny do reaktoru, kde dochází ke kontaktu se suspenzí. Při chemické reakci na sebe sorbent váže škodliviny ze spalín, zároveň se sorbent vysuší a je veden do tkaninového filtru. Spaliny musí mít před vstupem do filtru určitou teplotu, proto je někdy nutné jejich ochlazení na maximální přípustnou teplotu. Vysušený sorbent společně s popílkem se ve filtru zachytává a je odváděn do „popelnice“. Vyčištěné spaliny poté míří do komína.

Reaktor je válcová nádoba z oceli. Je opatřena výsypkou, nad kterou jsou rozprašovací trysky. Ty zajistí požadované rozprášení sorbentu. Jejich funkce je závislá na správných tlakových poměrech v trysce a na viskozitě vody a sorbentu. Dosoušecí komora je na reaktor připojena spojovacím kanálem. Zajišťuje dostatečnou reakční dobu pro nezbytné chemické reakce.

Systém přípravy sorbentu musí zajistit přesné dávkování sorbentu do rozprašovacích trysek. Technologie je opatřena čerpadly, nádrží na promíchávání sorbentu a automatickým proplachováním rozvodů, které je nutné provádět v časových intervalech.

Bezpečný provoz tkaninového filtru (tzn. provoz v předepsaných teplotách) zajišťuje dochlazovací klapa. Maximální teplota je závislá na použité filtrační látce. Nastavení je možné v rozmezí 150 – 300 °C. Pokud dojde k překročení maximální přípustné teploty, otevře se klapka studeného vzduchu. Klapka se opět uzavře po dostatečném ochlazení.

Elektrorozvaděč zajišťuje všechny automatické a poloautomatické funkce ekobloku a je propojen s elektrorozvaděčem zdroje spalin.

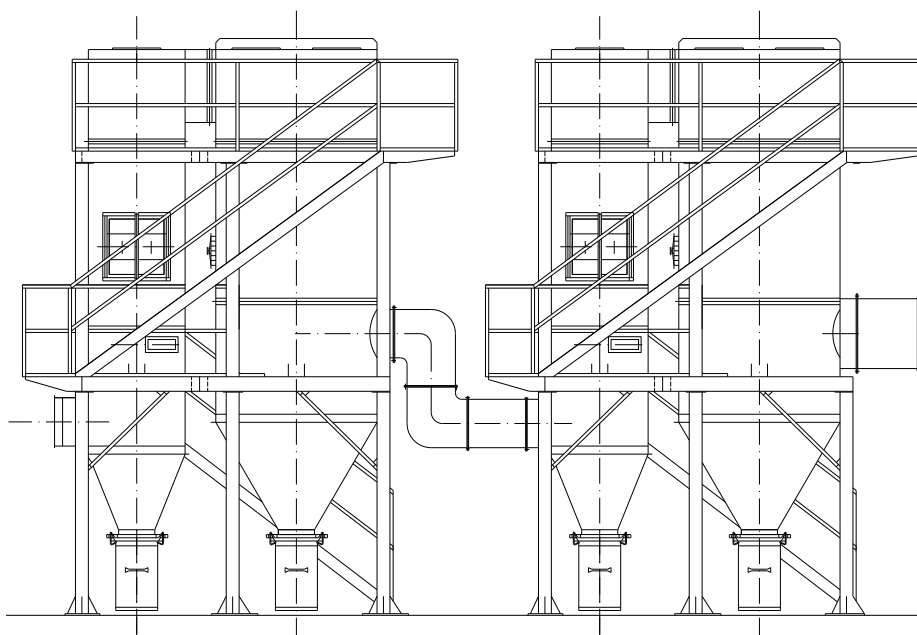
Hlavní body, které se sledují při provozu ekobloku:

- Teploty před a za reaktorem
- Hladina sorbentu v nádrži
- Stav a funkce dávkovacího čerpadla
- Odpor tkaninového filtru
- Tlakový vzduch

Pro případné poruchy má rozvaděč i zabezpečovací prvky, tj. hlavní vypínače, jističe, ochrana motorů apod. Samozřejmostí jsou i signalizace poruch jak akustické, tak optické. To vše je dáno příslušnými předpisy. [8, 9]

Funkční schéma jednostupňové uspořádání pračky spalin je uvedeno v příloze B.

Obr. 5.1, Dvoustupňová polosuchá pračka spalin typu PV 20



Funkční schéma dvoustupňového uspořádání pračky spalin je uvedeno v příloze C.

## 5.2 Určení množství spalin

Výpočty v bakalářské práci jsem provedl pro hnědé uhlí, které jsem vybral z katalogu uhlí společnosti Sokolovská uhelná a.s. pro rok 2010. Výsledky porovnám s charakteristickými veličinami pračky spalin, které udává výrobce a ověřím tak vhodnost použití zařízení.

Uhlí obsahuje 38 % vody ( $w^r$ ), 19% popele ( $A^d$ ) a výhřevnost hořlaviny je  $Q_i^h = 30,8$  MJ/kg.

Složení hořlaviny uhlí:

$$C^h = 72,92 \text{ [%]}$$

$$H^h = 6,11 \text{ [%]}$$

$$S^h = 1,29 \text{ [%]}$$

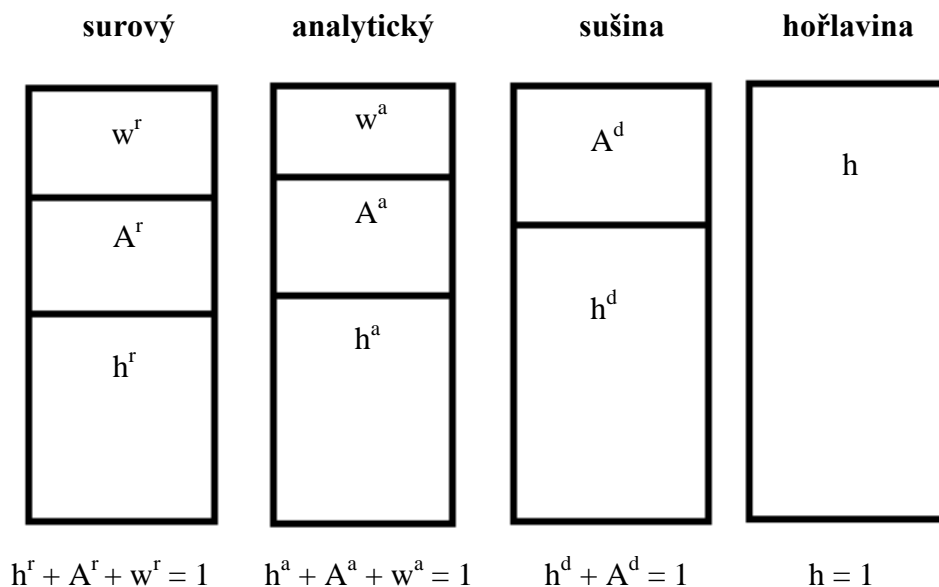
$$N^h = 0,87 \text{ [%]}$$

$$O_2^h = 18,81 \text{ [%]}$$



Existuje několik možností zadání obsahu každé složky v palivu. Na obrázku 5.1 jsou znázorněny jednotlivé složky pro 1 kg paliva a u každého vzorku přepočtový vztah.

Obr. 5.1, Přepočet složení uhlí



Uhlí je nutné přepočíst na surový vztah. Z výše uvedeného obrázku můžeme tedy odvodit přepočtový vztah:

$$x^r = x^h \cdot (1 - A^r - w^r) \quad (1)$$

kde:

x ... libovolná složka paliva

Poměrný hmotový obsah popeloviny v surovém stavu určíme dle vztahu:

$$A^r = A^d \cdot (1 - w^r) \quad (2)$$

$$A^r = 0,215 \cdot (1 - 0,38)$$

$$A^r = 0,1333 \rightarrow 13,33 \text{ [%]}$$

Po přepočtu na surový stav má uhlí následující složení:

$$C^r = 35,49 [\%]$$

$$H^r = 2,97 [\%]$$

$$S^r = 0,63 [\%]$$

$$N^r = 0,42 [\%]$$

$$O_2^r = 9,16 [\%]$$

$$A^r = 13,33 [\%]$$

$$w^r = 38 [\%]$$

### 5.2.1 Množství spalin na 1kg paliva

Pro zjištění objemového množství spalin na 1 kg paliva je nutné spočítat koncentrace jednotlivých složek. Ve výpočtech počítám s přebytkem vzduchu  $n = 1,2$  a korekčním součinitelem pro dané ohniště  $v = 1,02$ . [9]

Teoretické množství kyslíku –  $O_{2, \text{teor}}$

$$O_{2, \text{teor}} = \frac{22,4}{12} \cdot C^r + \frac{22,4}{4} \cdot H^r + \frac{22,4}{32} \cdot S^r - \frac{22,4}{32} \cdot O_2^r \quad (3)$$

$$O_{2, \text{teor}} = \frac{22,4}{12} \cdot 0,3549 + \frac{22,4}{4} \cdot 0,0297 + \frac{22,4}{32} \cdot 0,0063 - \frac{22,4}{32} \cdot 0,0916$$

$$O_{2, \text{teor}} = 1,268 [\text{m}_N^3/\text{kg}]$$

Teoretické množství spalovacího vzduchu –  $V_{VZ, \text{teor}}^S$

$$V_{VZ, \text{teor}}^S = \frac{1}{0,21} \cdot O_{2, \text{teor}} \quad (4)$$

$$V_{VZ, \text{teor}}^S = \frac{1}{0,21} \cdot 1,268$$

$$V_{VZ, \text{teor}}^S = 6,038 [\text{m}_N^3/\text{kg}]$$

Teoretické množství suchých spalín -  $V_{SP,teor}^S$

$$V_{SP,teor}^S = \frac{22,4}{12} \cdot C^r + \frac{22,4}{32} \cdot S^r + \frac{22,4}{28} \cdot N^r + 0,79 \cdot V_{VZ,teor}^S \quad (5)$$

$$V_{SP,teor}^S = \frac{22,4}{12} \cdot 0,3549 + \frac{22,4}{32} \cdot 0,0063 + \frac{22,4}{28} \cdot 0,0042 + 0,79 \cdot V_{VZ,teor}^S$$

$$V_{SP,teor}^S = 5,44 \text{ [m}_N^3/\text{kg]}$$

Teoretické množství vlhkých spalín -  $V_{SP,teor}^V$

$$V_{SP,teor}^V = V_{SP,teor}^S + V_{H_2O} = 5,44 + 0,9263 = 6,366 \text{ [m}_N^3/\text{kg]} \quad (6)$$

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{18} \cdot w^r + \frac{22,4}{2} \cdot H^r + (v - 1) \cdot V_{VZ,teor}^S \quad (7)$$

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{18} \cdot 0,38 + \frac{22,4}{2} \cdot 0,0297 + (1,02 - 1) \cdot 6,038$$

$$V_{H_2O} = 0,9263 \text{ [m}_N^3/\text{kg]}$$

Skutečné množství vlhkých spalín -  $V_{SP,skut}^V$

$$V_{SP,skut}^V = V_{SP,teor}^V + [v \cdot (n - 1) \cdot V_{VZ,teor}^S] \quad (8)$$

$$V_{SP,skut}^V = 6,366 + [1,02 \cdot (1,2 - 1) \cdot 6,038]$$

$$V_{SP,skut}^V = 7,598 \text{ [m}_N^3/\text{kg]}$$

Složení vlhkých spalín

$$V_{CO_2} = \frac{22,4}{12} \cdot C^r = \frac{22,4}{12} \cdot 0,3549 = 0,6625 \text{ [m}_N^3/\text{kg]} \quad (9)$$

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{18} \cdot w^r + \frac{22,4}{2} \cdot H^r + n \cdot (v - 1) \cdot V_{VZ,teor}^S \quad (10)$$

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{18} \cdot 0,38 + \frac{22,4}{2} \cdot 0,0297 + 1,2 \cdot (1,02 - 1) \cdot 6,038 = 0,9504 \text{ [m}_N^3/\text{kg]} \quad (11)$$

$$V_{SO_2} = \frac{22,4}{32} \cdot S^r = \frac{22,4}{32} \cdot 0,0063 = 0,0044 \text{ [m}_N^3/\text{kg]} \quad (12)$$

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28} \cdot N^r + 0,79 \cdot V_{VZ,teor}^S \cdot n = \frac{22,4}{28} \cdot 0,0042 + 0,79 \cdot 6,038 \cdot 1,2 \quad (13)$$

$$V_{N_2} = 5,7274 \text{ [m}_N^3/\text{kg]}$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (n - 1) \cdot V_{VZ,teor}^S = 0,21 \cdot (1,2 - 1) \cdot 6,038 = 0,2536 \text{ [m}_N^3/\text{kg}] \quad (14)$$

Koncentrace jednotlivých složek

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_{SP,skut}} = \frac{0,6625}{7,598} = 0,0872 \quad \rightarrow \quad 8,72 \text{ [%]} \quad (15)$$

$$H_2O = \frac{V_{H_2O}}{V_{SP,skut}} = \frac{0,9504}{7,598} = 0,1251 \quad \rightarrow \quad 12,51 \text{ [%]} \quad (16)$$

$$SO_2 = \frac{V_{SO_2}}{V_{SP,skut}} = \frac{0,0044}{7,598} = 0,0005 \quad \rightarrow \quad 0,05 \text{ [%]} \quad (17)$$

$$N_2 = \frac{V_{N_2}}{V_{SP,skut}} = \frac{5,7274}{7,598} = 0,7538 \quad \rightarrow \quad 75,38 \text{ [%]} \quad (18)$$

$$O_2 = \frac{V_{O_2}}{V_{SP,skut}} = \frac{0,2536}{7,598} = 0,0334 \quad \rightarrow \quad 3,34 \text{ [%]} \quad (19)$$

## 5.2.2 Množství spalín pro jmenovité množství uhlí

Množství spáleného uhlí  $\dot{M}_{pal}$ :

$$\dot{M}_{pal} = \frac{P}{\eta \cdot Q_i^r} \quad (20)$$

kde:

P ... jmenovitý výkon kotle

$\eta$  ... účinnost kotle

$Q_i^r$  ... výhřevnost paliva

Výhřevnost paliva určíme podle vztahu:

$$Q_i^r = Q_i^h \cdot (1 - w^r - A^r) \quad (21)$$

$$Q_i^r = 30,8 \cdot (1 - 0,38 - 0,1333)$$

$$Q_i^r = 14,99 \text{ [MJ/kg]}$$

Účinnost kotle pro tepelný výkon 1,5 MW volím  $\eta = 0,83$ . [9]

$$\dot{M}_{\text{pal}} = \frac{P}{\eta \cdot Q_{\text{f}}}$$

$$\dot{M}_{\text{pal}} = \frac{1,5 \cdot 10^6}{0,83 \cdot 14,99 \cdot 10^6}$$

$$\dot{M}_{\text{pal}} = 0,121 \text{ [kg/s]}$$

Množství spalin pro jmenovité množství uhlí -  $\dot{V}_{\text{SP,celk}}$

$$\dot{V}_{\text{SP,celk}} = V_{\text{SP,SK}}^V \cdot M_{\text{PAL}} \quad (22)$$

$$\dot{V}_{\text{SP,celk}} = 7,598 \cdot 0,121$$

$$\dot{V}_{\text{SP,celk}} = 0,919 \text{ [m}_N^3/\text{s]}$$

Přepočet množství spalin na teplotu 250 °C (teplota na vstupu do pračky)

$$\dot{V}_{\text{SP}} = \dot{V}_{\text{SP,celk}} \cdot \frac{T_N + t_{\text{sp}}}{T_N} \quad (23)$$

$$\dot{V}_{\text{SP}} = 0,919 \cdot \frac{273 + 250}{273}$$

$$\dot{V}_{\text{SP}} = 1,76 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

### 5.3 Určení množství sorbentu

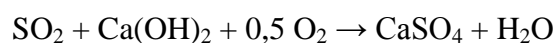
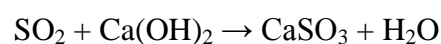
Podle množství SO<sub>2</sub>, který vznikne spálením paliva, získáme potřebné množství sorbentu:

$$\dot{m}_{\text{SO}_2} = 2 \cdot \frac{S}{100} \cdot M_{\text{pal}} \quad (24)$$

kde:

S ... obsah síry v palivu [%]

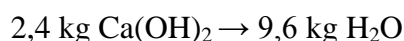
Množství sorbentu určíme pomocí reakcí oxidu siřičitého dle chemických rovnic:



$$\begin{array}{ccc} 64 \text{ kg SO}_2 & \dots\dots & 74,1 \text{ kg Ca(OH)}_2 \\ 1 \text{ kg SO}_2 & \dots\dots & 1,2 \text{ kg Ca(OH)}_2 \end{array}$$

Na 1 kg oxidu siřičitého připadá 1,2 kg Ca(OH)<sub>2</sub>. Lepšího odsíření se dosáhne, pokud bude množství Ca(OH)<sub>2</sub> 2x vyšší, vyplývá to z experimentálních měření. V dalších výpočtech budeme tedy postupovat tak, že na 1 kg SO<sub>2</sub> připadne 2,4 kg Ca(OH)<sub>2</sub>.

Celkové množství sorbentu dostaneme smícháním Ca(OH)<sub>2</sub> a vody. Pro zvolené zařízení je výrobcem udáván poměr 1:4. Pokud promítneme tento poměr do rovnice, získáme celkové množství sorbentu.



Na 1 kg oxidu siřičitého připadá 12 kg sorbentu. Abychom určili objemové množství sorbentu připadající na 1 kg oxidu siřičitého, je nutné znát vybrané veličiny – hustota vody je  $\rho_v = 1000 \text{ kg/m}^3$ , hustota Ca(OH)<sub>2</sub> je  $\rho = 2380 \text{ kg/m}^3$ . Výsledná hustota sorbentu je  $\rho_s = 1131,19 \text{ kg/m}^3$ . Po přepočtu připadá na 1 kg SO<sub>2</sub> 10,61 l sorbentu.

Oxid siřičitý vzniká spalováním paliva a jeho množství zjistíme ze vztahu:

$$\dot{m}_{\text{SO}_2} = 2 \cdot \frac{S}{100} \cdot M_{\text{pal}}$$

$$\dot{m}_{\text{SO}_2} = 2 \cdot \frac{0,63}{100} \cdot 0,121$$

$$\dot{m}_{\text{SO}_2} = 0,001525 \text{ [kg/s]} \rightarrow 5,489 \text{ [kg/hod]}$$

Množství hydroxidu vápenatého - Ca(OH)<sub>2</sub>

$$\dot{m}_{\text{Ca(OH)}_2} = 2,4 \cdot \dot{m}_{\text{SO}_2} \quad (25)$$

$$\dot{m}_{\text{Ca(OH)}_2} = 2,4 \cdot 5,489$$

$$\dot{m}_{\text{Ca(OH)}_2} = 13,17 \text{ [kg/hod]}$$

Množství vody - H<sub>2</sub>O

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = 9,6 \cdot \dot{m}_{\text{SO}_2} \quad (26)$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = 9,6 \cdot 5,489$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = 52,69 \text{ [kg/hod]}$$

$$\rightarrow \dot{V}_{\text{H}_2\text{O}} = 52,69 \text{ [l/hod]}$$

Celkové množství sorbentu

$$\dot{V}_{\text{SORB}} = 10,61 \cdot \dot{m}_{\text{SO}_2} \quad (27)$$

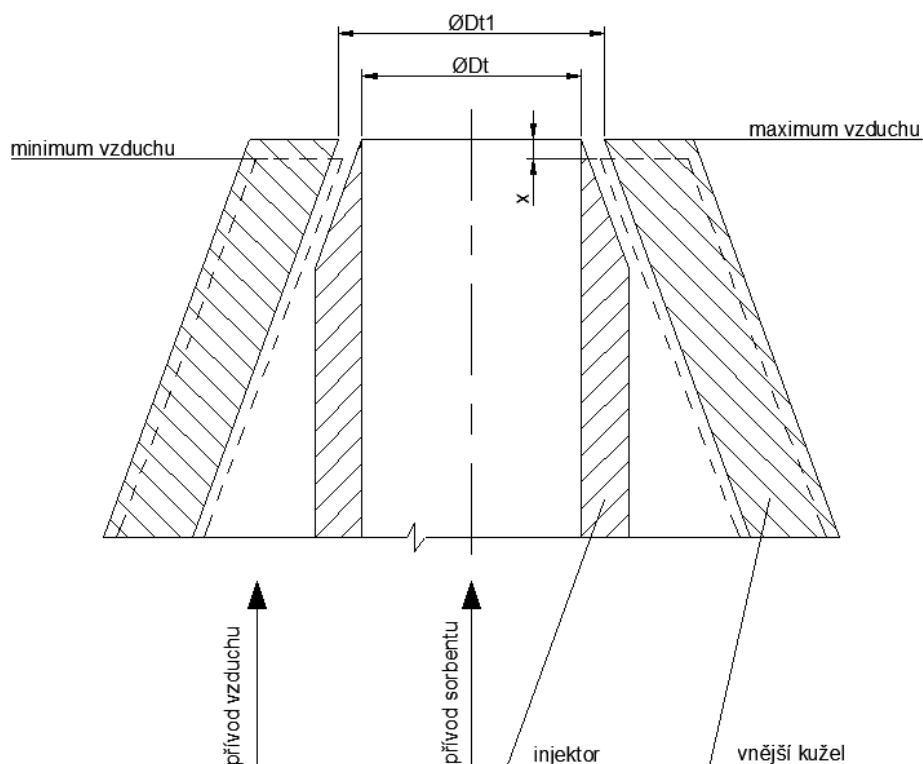
$$\dot{V}_{\text{SORB}} = 10,61 \cdot 5,489$$

$$\dot{V}_{\text{SORB}} = 58,24 \text{ [l/hod]}$$

Výsledná spotřeba sorbentu je 58,24 l/hod. V pračce jsou umístěny dvě trysky pro rozprašení sorbentu, na jednu trysku tedy připadá množství 29,12 litrů sorbentu za hodinu. [3, 8, 9]

## 6 TRYSKA SORBENTU

Tryska pro rozprašení sorbentu musí splňovat několik požadavků. Tím hlavním je dokonalé rozprašení sorbentu, abychom docílili optimálního promísení se spaliny a žádoucí chemické reakce. Pro zvolené zařízení jsem zvolil dvě trysky, z nichž na každou připadá 29,12 litrů sorbentu za hodinu. Sorbent se rozprašuje pomocí stlačeného vzduchu o hodnotě 0,9 MPa. Úhel rozprachu sorbentu je 30 – 35°. Detail trysky je znázorněn na obrázku 6.1. Vnější kuželem se reguluje objemový přítok vzduchu, vnitřní průměr  $Dt = 6$  mm,  $Dt1 = 6,8$  mm. Údaj  $x$  nám udává možné posunutí vnějšího kužele z minimální hodnoty do maximální a jeho hodnota je 4 mm. V maximální poloze je spotřeba vzduchu 35 m<sup>3</sup>/h a v poloze minimální je to 17 m<sup>3</sup>/h.



## 7 ZÁVĚR

V bakalářské práci jsem vypracoval návrh zařízení pro čištění spalin z roštového kotle spalujícího hnědé uhlí. Tepelný výkon kotle je 1,5 MW a teplota znečištěných spalin na vstupu do pračky je 250 °C.

Nejprve jsem popsal znečišťující látky, které vznikají při spalování uhlí, a poté jsem uvedl základní metody čištění spalin. Pro výpočet jsem si vybral hnědé uhlí společnosti Sokolovská uhelná a.s. Aby bylo možné provádět jakékoliv výpočty, bylo nejdříve nutné přepočítat složení uhlí na surový stav.

V práci se zabývám polosuchou metodou čištění spalin, což znamená, že do proudu spalin je rozprášen sorbent. V mém případě se jedná o vápennou suspenzi, která na sebe při chemické reakci zachycuje SO<sub>2</sub>. Optimální rozprášení suspenze zajišťuje speciální tryska, která sorbent rozpraší pomocí stlačeného vzduchu. Tím dosáhneme dokonalého promísení a žádoucí chemické reakce.

Pračku spalin, kterou jsem si vybral pro svou práci, je od společnosti Fornax a.s. a v bakalářské práci jsou uvedeny základní technické parametry a údaje pro správné použití. Množství spalin vstupujících do pračky je  $\dot{V}_{SP,celk} = 0,919 \text{ m}_N^3/\text{s}$  a celková spotřeba sorbentu činí 58,24 litrů za hodinu. V pračce jsou dvě trysky, na každou tedy připadá 29,12 litrů za hodinu. Pomocí výpočtů a základních údajů zvolené pračky, které udává výrobce, jsem ověřil vhodnost použití tohoto zařízení pro danou problematiku.

Přestože byla pračka navržena pro kotelny spalující hnědá uhlí, své uplatnění najde i při spalování odpadů.



## Příloha A

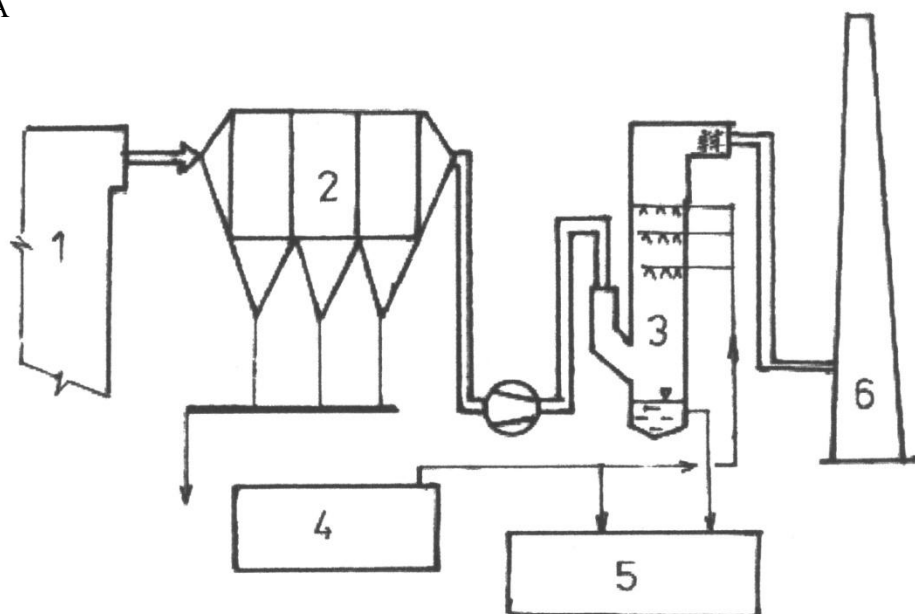


Schéma zařízení mokré metody čištění spalin

1 – spalovací pec, 2 – elektroodlučovač, 3 – pračka, 4 – vápenné hospodářství,  
5 – úprava odpadních vod, 6 - komín

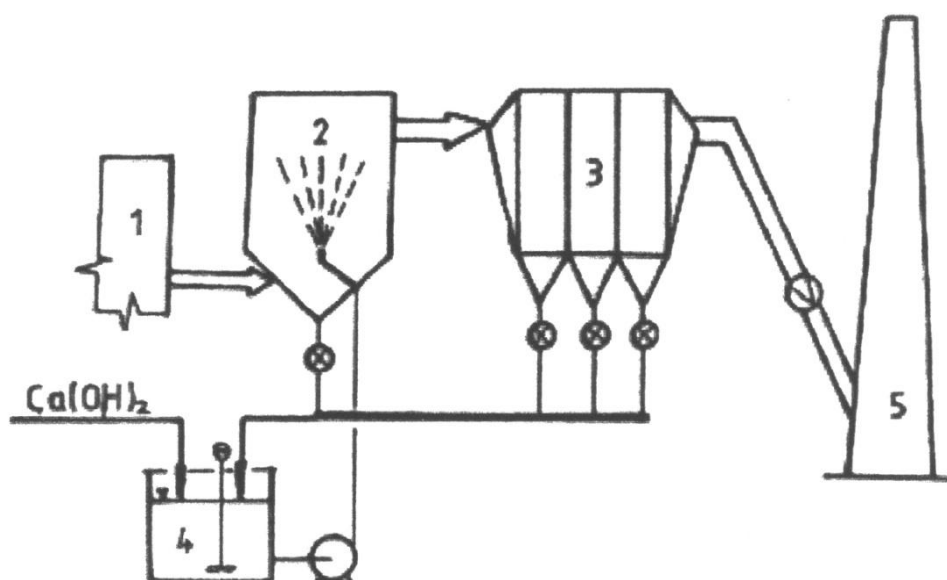


Schéma zařízení polosuché metody čištění spalin

1 – spalovací pec, 2 – pračka, 3 – filtr, 4 – zásobník sorbentu, 5 – komín

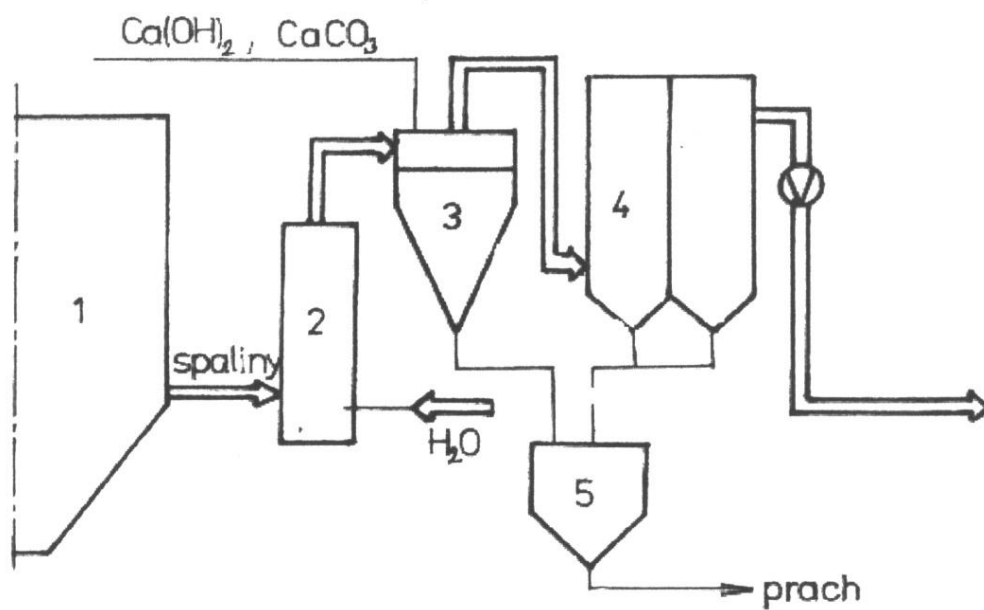
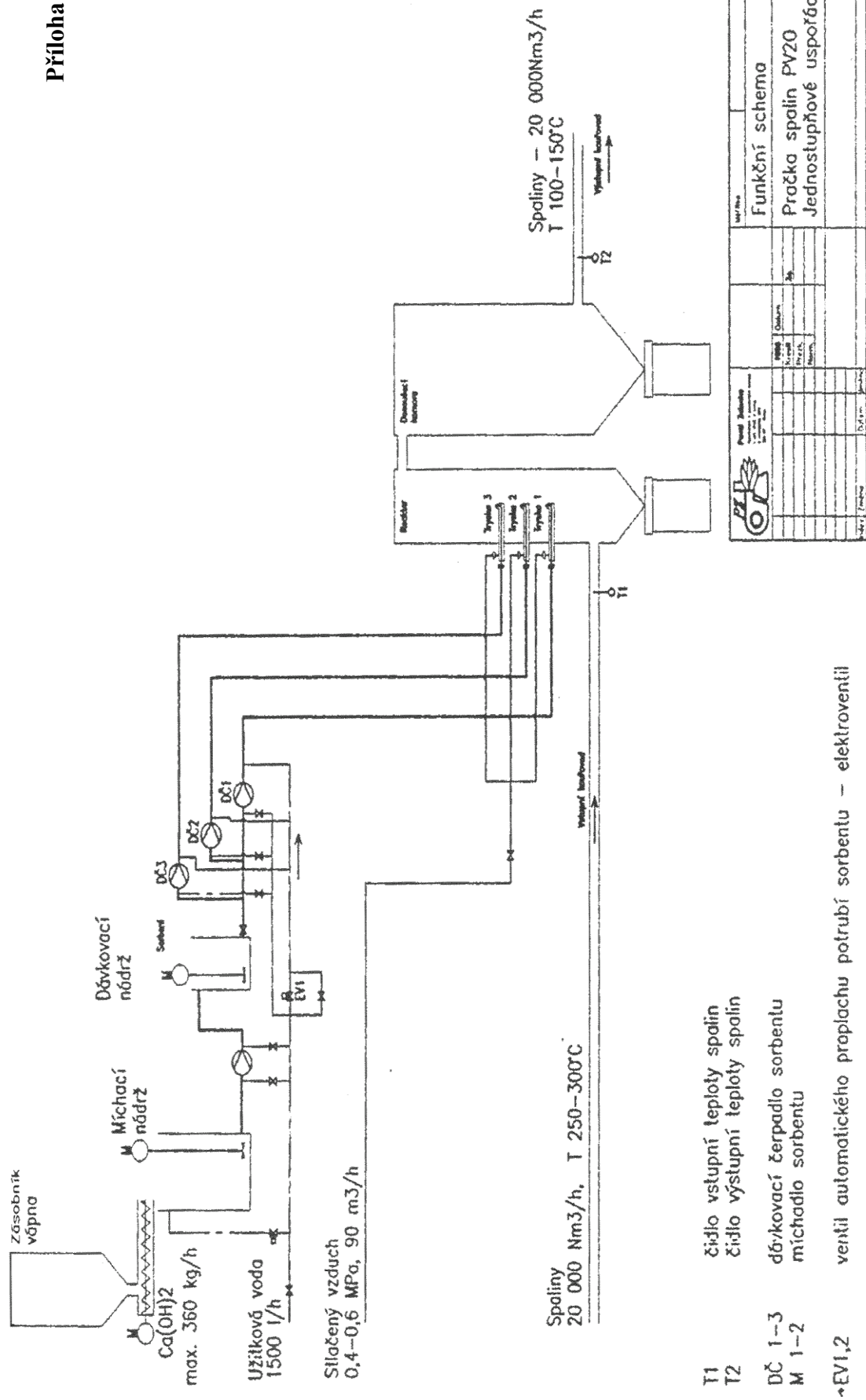


Schéma zařízení suché metody čištění spalin

1 – spalovací pec, 2 – chladič, 3 – reaktor, 4 – filtr, 5 – zásobník prachu

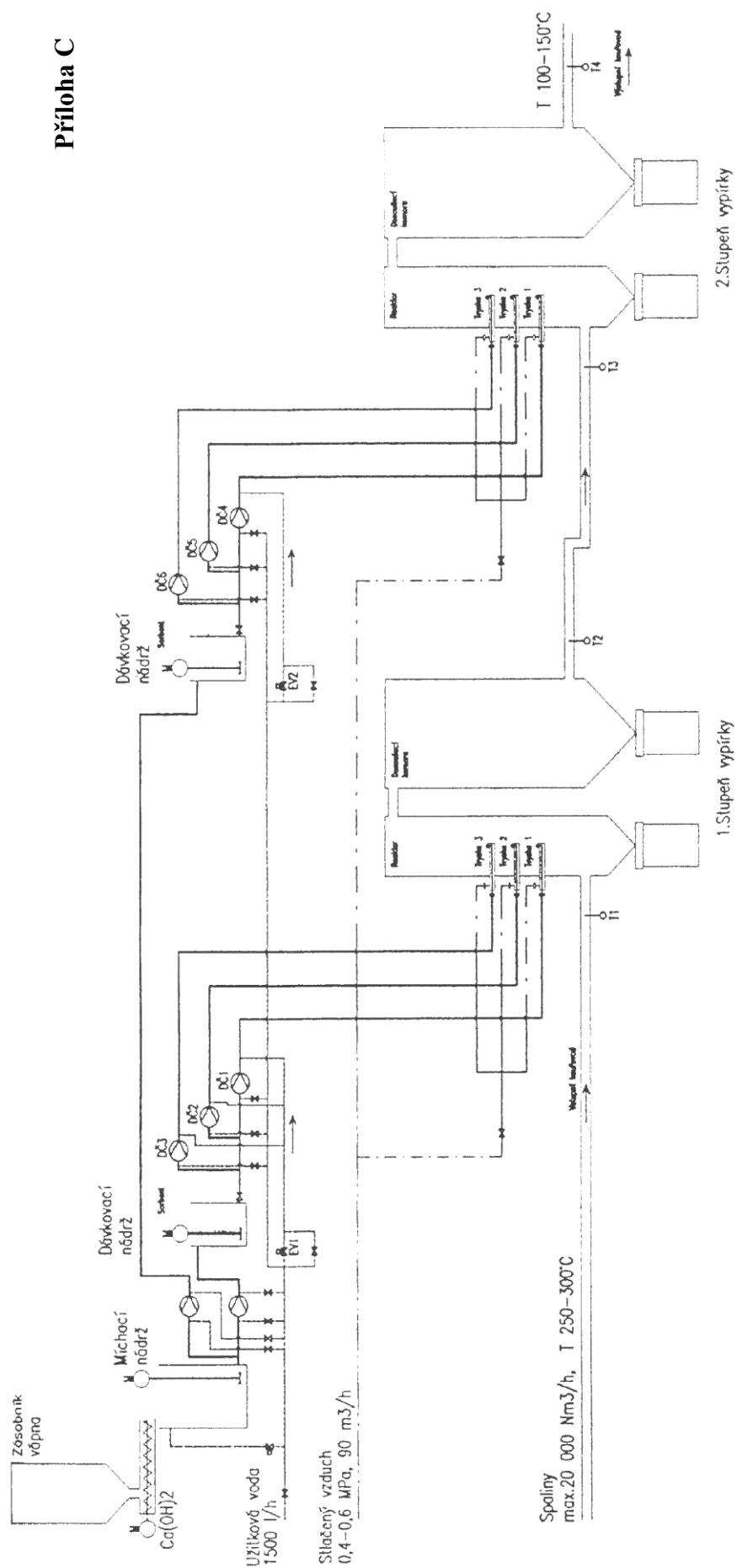
# Příloha B



- T1 židlo vstupní teploty spalin
- T2 židlo výstupní teploty spalin
- DČ 1–3 dávkovací čerpadlo sorbentu
- M 1–2 míchadlo sorbentu
- EV1,2 ventil automatického proplachu potrubí sorbentu – elektroventil

Projekt		Funkční schéma	
Průmyslová zařízení		Pračka spalin PV20	
Jednotupňové uspořádání		Jednotupňové uspořádání	
Lis 1		Lis 2	
Lis 3		Lis 4	
Lis 5		Lis 6	
Lis 7		Lis 8	
Lis 9		Lis 10	
Lis 11		Lis 12	
Lis 13		Lis 14	
Lis 15		Lis 16	
Lis 17		Lis 18	
Lis 19		Lis 20	
Lis 21		Lis 22	
Lis 23		Lis 24	
Lis 25		Lis 26	
Lis 27		Lis 28	
Lis 29		Lis 30	
Lis 31		Lis 32	
Lis 33		Lis 34	
Lis 35		Lis 36	
Lis 37		Lis 38	
Lis 39		Lis 40	
Lis 41		Lis 42	
Lis 43		Lis 44	
Lis 45		Lis 46	
Lis 47		Lis 48	
Lis 49		Lis 50	
Lis 51		Lis 52	
Lis 53		Lis 54	
Lis 55		Lis 56	
Lis 57		Lis 58	
Lis 59		Lis 60	
Lis 61		Lis 62	
Lis 63		Lis 64	
Lis 65		Lis 66	
Lis 67		Lis 68	
Lis 69		Lis 70	
Lis 71		Lis 72	
Lis 73		Lis 74	
Lis 75		Lis 76	
Lis 77		Lis 78	
Lis 79		Lis 80	
Lis 81		Lis 82	
Lis 83		Lis 84	
Lis 85		Lis 86	
Lis 87		Lis 88	
Lis 89		Lis 90	
Lis 91		Lis 92	
Lis 93		Lis 94	
Lis 95		Lis 96	
Lis 97		Lis 98	
Lis 99		Lis 100	

## Příloha C



T1,T3	čidlo vstupní teploty spalin
T2,T4	čidlo výstupní teploty spalin
DČ 1-6	dávkovací čerpadlo sorbentu
M 1-3	míchadlo sorbentu
EV1,2	ventil automatického proplachu

[illegible]

## Použitá literatura

- [1] <http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=677>, Portál TZB-info, stavebnictví, úspory energií
- [2] <http://www.fsid.cvut.cz/cz/U207/U2072/RO.ppt>, CVUT Praha
- [3] Noskovič P., Spalování uhlí, VŠB Ostrava, 1993
- [4] PROJEKT MPO ČR, „Překlad referenčních dokumentů o nejlepších technikách (BREF) pro velká spalovací zařízení“
- [5] <http://www.vodni-tepelne-elektrarny.cz/odsireni-denitrifikace.htm>, Vodní a tepelné elektrárny
- [6] [http://www.cez.cz/edee/conect/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/02/vypirka\\_5.html](http://www.cez.cz/edee/conect/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/02/vypirka_5.html), skupina ČEZ
- [7] <http://www.vscht.cz/uchop/udalosti/skripta/skriptaOOaCOP/87-164.doc>
- [8] prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc, Katedra energetiky VŠB Ostrava, Posudek na pračky spalin typu PV-F800, 2002
- [9] Černý V., Janeba B., Teyssler J.: Parní kotle, Praha 1983
- [10] <http://www.fornax.cz>, společnost Fornax a.s.

## Seznam příloh

- A) Schéma zařízení mokré metody čištění spalin,  
Schéma zařízení polosuché metody čištění spalin,  
Schéma zařízení suché metody čištění spalin
- B) Pračka spalin PV20, jednostupňové uspořádání
- C) Pračka spalin PV20, dvoustupňové uspořádání